**文章编号**: 1001-1455(2014)05-0608-07 **DOI**: 10.11883/1001-1455(2014)05-0608-07

# 3 种小口径步枪弹的致伤效应*

刘 坤[1,2],吴志林[1],徐万和[1],莫根林[1]
(1. 南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094;
2. 南京造币有限公司,江苏 南京 211100)

**摘要**: 探讨小口径枪弹的杀伤性能,将 SS109 5.56 mm、M74 5.45 mm、87 式 5.8 mm 等 3 种小口径步枪弹结构特点、性能参数及明胶中运动规律进行了对比评测;以明胶为组织模拟物开展了步枪弹侵彻靶标实验,并对 3 种步枪弹侵彻明胶实验数据进行对比分析。分析结果表明,我国 87 式 5.8 mm 普通弹杀伤性能优于 SS109 5.56 mm 和 M74 5.45 mm 步枪弹,较好验证了理论分析结果。

**关键词**: 爆炸力学;致伤效应;"颈部"长度;小口径步枪弹;明胶
**中图分类号**: O385 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

20 世纪 60 年代初,M16 小口径步枪被成功设计出后,小口径班用武器便以体积小、质量轻、精度高、后坐力小及弹头初速大、杀伤效果好而受到青睐,M193 枪弹随 M16 装备部队,从此揭开了小口径枪弹序幕。70 年代,苏联开始小口径枪弹的研究工作,正式定型并列装供 AK74 突击步枪使用的 5.45 mm枪弹。80 年代初,北约组织成员国通过选型实验,正式确定比利时改进的 SS109 枪弹为第 2 种制式枪弹,可配各种枪型使用;同时,中国也相应研制出 5.8 mm 步枪弹。步枪、轻机枪弹药向小口径方向发展,其明显优点是:全弹重减轻 25%左右,可提高弹药携带量;枪口动能小、后坐冲量小,射弹单发及连发精度好;弹形较好,存速能力强,弹头直径小,断面比动能大,侵彻钢板、木板性能较好[1-4]。小口径枪弹出现后,许多学者对其致伤效应开展研究。傅荣向[5]通过对 M193、SS109、5.45 mm 步枪弹、5.8 mm普通弹和 56 式 7.62 mm 普通弹侵彻生物和肥皂靶标实验,对小口径枪弹致伤效果展开研究,认为小口径枪弹杀伤威力优于 56 式 7.62 mm 普通弹;刘宏勋等[6]通过 M193、SS109、5.8 mm 步枪弹侵彻钢板和肥皂靶标实验,对 3 种小口径枪弹威力进行了评测,认为 5.8 mm 步枪弹穿透能力较好;马式曾[7]从弹壳、弹头及内外弹道性能 3 个方面对 SS109 和 5.45mm 步枪弹进行了对比分析,认为 5.45 mm步枪弹综合性能占有一定优势。可见,目前对 3 种小口径枪弹致伤效应的研究均从实验角度出发,而基于运动模型对小口径枪弹的致伤效应的理论分析未见报道。

基于前期就弹头侵彻明胶平面运动模型已开展大量工作[8-9],本文中对 SS109 5.56 mm、M74 式 5.45 mm、87 式 5.8 mm 等 3 种小口径步枪弹的致伤效应展开理论研究,并对其致伤效果进行对比评测;同时,对 3 种步枪弹侵彻明胶实验结果进行对比分析,以期为轻武器弹药设计提供理论指导。

## 1 3 种小口径步枪弹致伤效应理论分析

为获得 3 种典型小口径步枪弹致伤效应,本节将对各步枪弹结构特点、性能参数及明胶中运动规律进行理论分析。

### 1.1 结构特点

3 种小口径步枪弹弹头结构在设计上均具有初速高、质量小、头弧尖长、长径比大的特点,如图 1 所示,结构参数如表 1 所示。

* **收稿日期**: 2013-01-22; **修回日期**: 2013-09-01
**基金项目**: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(613104);南京理工大学优秀博士论文培养基金项目;江苏省博士研究生科研创新培养基金项目(CXLX11_0273)
**作者简介**: 刘 坤(1986— ),男,博士研究生。

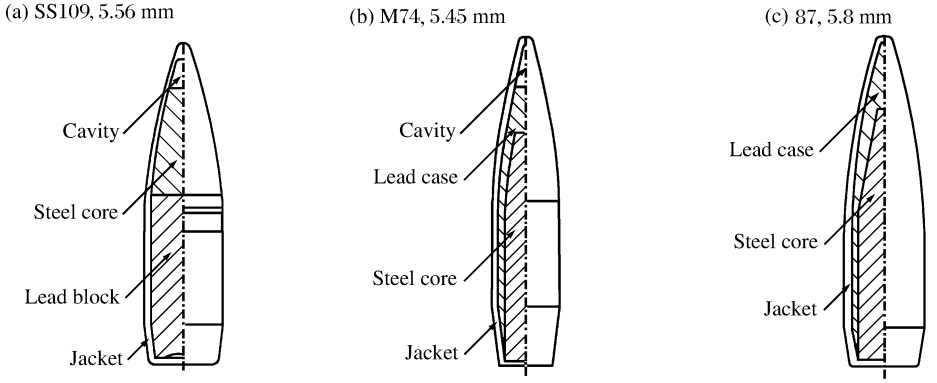



图 1　小口径步枪弹结构图

Fig. 1　Sketch of rifle bullet

**表 1　弹头结构参数**

**Table 1　Parameters of rifle bullet structure**

| 弹型 | $m$/g | $d$/mm | $l$/mm | $I_b$/(kg·m$^2$) |
|---|---|---|---|---|
| SS109 5.56 mm | 4.00 | 5.70 | 23.0 | $1.120\times10^{-7}$ |
| M74 式 5.45 mm | 3.45 | 5.63 | 25.4 | $1.367\times10^{-7}$ |
| 87 式 5.8 mm | 4.20 | 6.01 | 24.5 | $1.381\times10^{-7}$ |

**1.1.1**　SS109 5.56 mm 弹

SS109 弹头为尖头、锥底、钢/铅芯复合结构、铜被甲[10-12]。弹头结构如图 1(a)所示。该弹结构特点为：(1)弧形部半径较大，可改善弹形；(2)弹头长径比较大，增加了弹头质量系数及提高存速能力；(3)线膛缠距缩短，提高飞行稳定性；(4)采用钢/铅芯复合结构弹芯，弹尖部有空腔，可兼顾侵彻和杀伤作用。

**1.1.2**　M74 式 5.45 mm 弹

M74 式 5.45 mm 弹为钢铅复合结构，弹头结构如图 1(b)所示。该弹性能和结构设计特点为[13]：(1)弹尖部有约 3 mm 长空腔；(2)弹头弧形部半径较大，约为口径的 11 倍，有利于减小飞行阻力，长径比和质量系数较大，可提高存速、存能能力；(3)具有良好侵彻能力和杀伤效果，弹头较长，侵入目标后易翻滚，能造成较大创伤，且弹尖部空腔可调整弹头重心，击中目标时钢芯与铅套前冲发生变形，增大弹头不稳定性，提高杀伤效果。

**1.1.3**　87 式 5.8 mm 普通弹

87 式 5.8 mm 普通弹采用全被甲弹头，结构为尖头、锥底，由淬硬钢芯、铅套覆铜钢被甲组成，具有较强侵彻能力[14-17]。弹头结构如图 1(c)所示。该弹在性能上具有以下优点[1]：(1)初速高，弹道更低伸；(2)弹头重，枪口动能大，中远距离存速能力强。

## 1.2　性能参数

3 种步枪弹中，SS109 5.56 mm 步枪弹采用淬火钢芯和铅芯，即钢/铅芯复合结构弹芯；M74 式 5.45 mm步枪弹由弹头壳、铅套和钢芯组成，钢芯质量相对增大，弹尖部有空腔；87 式 5.8 mm 普通弹结构为尖头、锥底，由覆铜钢被甲、铅套和淬硬钢芯组成，性能参数如表 2 所示。

**表 2　弹头运动参数**

**Table 2　Parameters of rifle bullet motion**

| 弹型 | $v_0$/(m·s$^{-1}$) | $E$/J | $i$ | $\lambda$ | $\lambda_s$ |
|---|---|---|---|---|---|
| SS109 5.56 mm | 925 | 1 711 | 1.01 | 4.04 | 9.0 |
| M74 式 5.45 mm | 900 | 1 397 | 0.94 | 4.51 | 11.0 |
| 87 式 5.8 mm | 950 | 1 873 | 0.95 | 4.08 | 9.5 |

表中：$v_0$ 为弹头初速，$E$ 为枪口动能，$i$ 为弹形系数，$\lambda$ 为长径比，$\lambda_s$ 为弧形部分半径与口径之比。

由表 1～2 可知,87 式 5.8 mm 普通弹相较 SS109 5.56 mm 和 M74 式 5.45 mm 步枪弹弹头较重,初速较高,枪口动能大。根据空气动力学原理,弹头初速增加,能增大飞行距离,使弹道更低伸,减少外界条件对弹头飞行影响,增大杀伤力和对目标贯穿能力。

根据刘宏勋等[6]、郭守伟等[16-17]对 3 种小口径步枪弹实验研究可知,600 m 距离上侵彻 2 mm 冷轧钢板加松木板构成的复合目标时 87 式 5.8 mm 普通弹侵入木板深度达 140 mm,分别深于 M74 式 5.45 mm和 SS109 5.56 mm 步枪弹 24 和 54 mm。

综上可知,从性能参数的对比可知,87 式 5.8 mm 普通弹相较 M74 式 5.45 mm 和 SS109 5.56 mm 步枪弹,直射距离、同等距离内侵彻力、杀伤威力及中远距离存速能力较强。

### 1.3 明胶中运动规律

#### 1.3.1 运动模型

弹头在明胶中运动初始阶段,形成空腔的"颈部",可看作稳定飞行阶段,轨迹近似水平。若弹头偏角大于 10°,认为"翻滚"阶段开始。弹头速度方向将发生变化,不再近似水平,运动方程可表示为[8-9]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = -\left(\frac{1}{2}\rho A_0\right) v^2 C_{L0} \cos^2\delta \sin(2\delta) \sin(\psi-\delta) - \left(\frac{1}{2}\rho A_0\right) v^2 C_{D0} (1 + C_1 \sin^2\delta) \cos(\psi-\delta) \\ m\ddot{y} = \left(\frac{1}{2}\rho A_0\right) v^2 C_{L0} \cos^2\delta \sin(2\delta) \cos(\psi-\delta) - \left(\frac{1}{2}\rho A_0\right) v^2 C_{D0} (1 + C_1 \sin^2\delta) \sin(\psi-\delta) \\ I_b\ddot{\psi} = \left(\frac{1}{2}\rho v^2\right) A_0 l C_{M0} \sin\delta - \left(\frac{1}{2}\rho v^2\right) A_0 l \left(\frac{\mathrm{d}\dot{\psi}}{v}\right) C_{zz} \end{cases} \tag{1}$$

式中:$m$ 为弹头质量,$\rho$ 为明胶密度,$v$ 为弹头速度,$C_{D0}$ 为阻力系数,$C_1$ 为常数,$A_0$ 为弹头特征面积(取弹头最大横截面积,$A_0=\pi d^2/4$),$\delta$ 为攻角,$\psi$ 为偏角,攻角 $\delta$ 与偏角 $\psi$ 间的关系为 $\delta=\psi-\arctan\frac{v_y}{v_x}$,$v_x=\dot{x}$ 为弹头质心速度在 $x$ 方向分量,$v_y=\dot{y}$ 为弹头质心速度在 $y$ 方向分量;$I_b$ 为弹头赤道转动惯量,$C_{L0}$ 为升力系数,$C_{M0}$ 为翻滚力矩系数,$C_{zz}$ 为偏航阻尼力矩系数导数,$l$ 为弹头长度,$d$ 为弹头直径。

#### 1.3.2 算例与分析

为保证理论分析和实验的可对比性,模型计算的初始条件和实验所测得的弹头运动参数相同。SS109 5.56 mm 步枪弹入靶速度为 833.2 m/s,初始攻角为 1.4°,初始偏角为 2.5°;M74 式 5.45 mm 步枪弹入靶速度为 884.2 m/s,初始攻角为 1°,初始偏角为 1.84°;87 式 5.8 mm 步枪弹入靶速度为 847.5 m/s,初始攻角为 1°,初始偏角为 1.3°。通过式(1)弹头侵彻明胶运动模型,可得 3 种小口径步枪弹侵彻位移-时间、速度-侵彻位移关系曲线分别如图 2～3 所示。由图 2 中可知,3 种小口径步枪弹在靶标中运动理论时间分别为 445、449 和 490 μs;

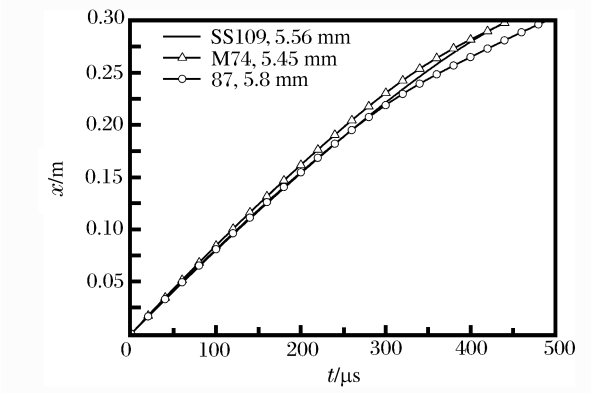



图 2 侵彻位移-时间关系曲线

Fig. 2 Relation between penetration depth and time

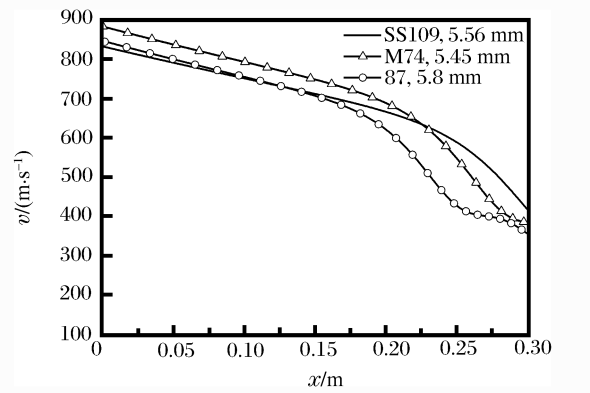



图 3 速度-侵彻位移曲线

Fig. 3 Relation between velocity and penetration depth

$y$ 方向偏移-侵彻位移关系曲线和偏角-位移关系曲线分别如图 4～5 所示。由图 4 可知,$y$ 方向偏移最大值分别为 0.010、0.013 和 0.014 m。由图 5 可知,出靶角度分别为 87.4°、174.8°和 247.9°。

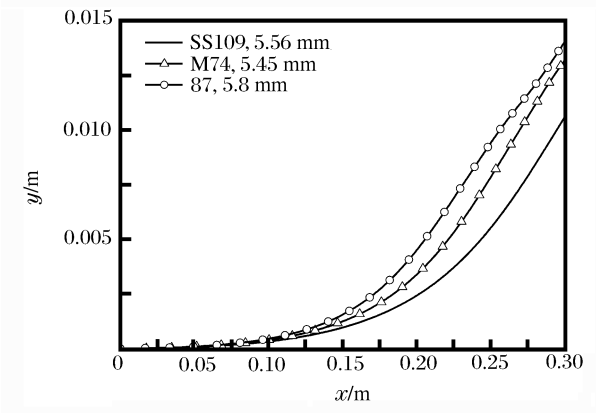



图 4　$y$ 方向偏移-侵彻位移关系曲线

Fig. 4　Relation between drift in $y$ direction and penetration depth

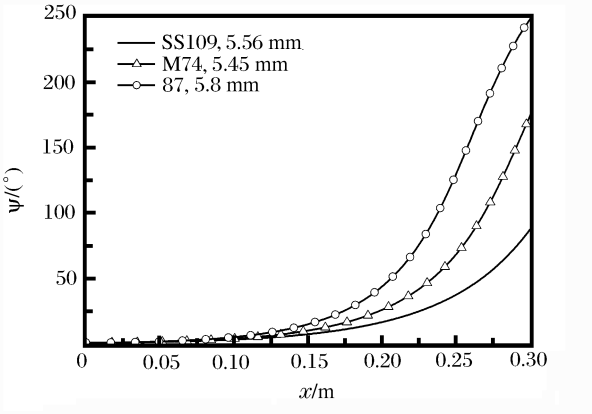



图 5　偏角-侵彻位移关系曲线

Fig. 5　Relation between yaw angle and penetration depth

弹头在明胶中运动初始阶段，即形成空腔的“颈部”阶段。3 种小口径枪弹“颈部”阶段曲线如图 6 所示。角速度-位移曲线和加速度-位移曲线分别如图 7～8 所示。由图 6～8 可知，3 种小口径步枪弹“颈部”长度分别为 0.169、0.149和0.131 m；对比图 3 中可知，“颈部”阶段结束时速度分别为 696.9、750.0 和 726.9 m/s；出靶速度分别为417.4、384.1 和 355.4 m/s。当侵彻位移分别为0.30、0.29和 0.26 m时，角速度分别达到最大值 11 120、17 592和19 677 rad/s；侵彻位移分别为0.289、0.255和 0.226 m 时，加速度分别达到最大值 1 923、2 399和 2 363 km/s$^2$。

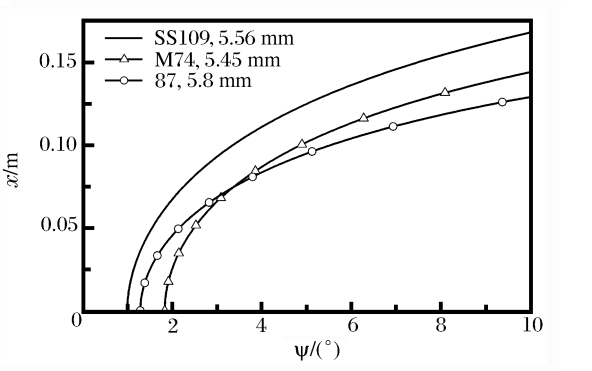



图 6　小口径枪弹“颈部”长度对比

Fig. 6　Comparison between the length of “narrow channel”

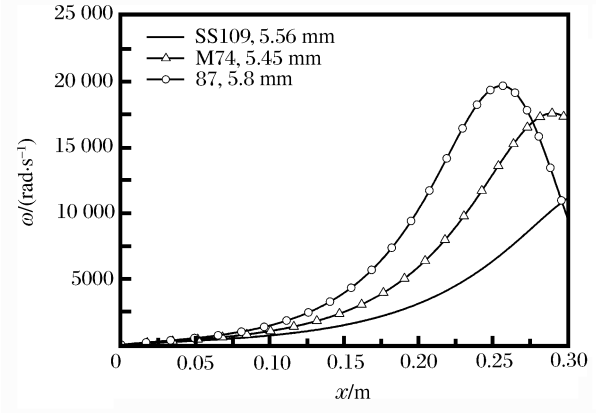



图 7　角速度-侵彻位移关系曲线

Fig. 7　Relation between angular speed and penetration depth

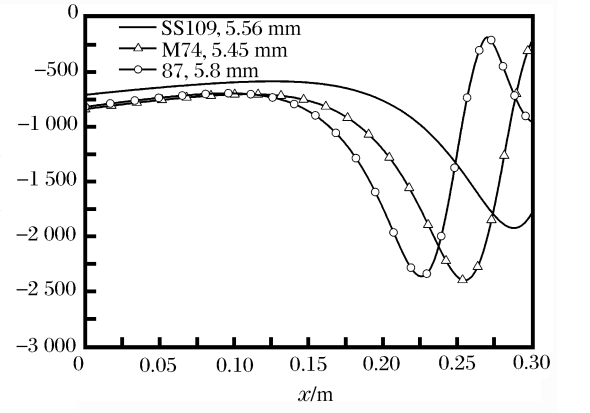



图 8　加速度-侵彻位移关系曲线

Fig. 8　Relation between acceleration and penetration depth

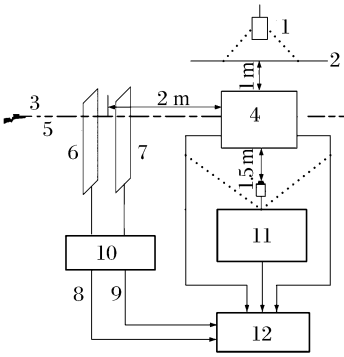
从结构特点、性能参数、明胶中运动规律 3 方面对致伤效应进行了对比研究。结果表明，87 式 5.8 mm普通弹相较 M74 式 5.45 mm 和 SS109 5.56 mm 步枪弹，直射距离、同等距离内侵彻力、杀伤威力及中远距离存速能力较强；明胶中“颈部”长度较短，速度衰减快，易翻滚，出靶偏角大；传递给目标能量及形成的永久空腔较大，能量传递高，致伤效果好，综合性能具有一定优势。

## 2 实验验证与结果分析

### 2.1 实验方法

为验证 3 种小口径枪弹致伤效应理论分析结果，进行步枪弹侵彻明胶靶标实验。采用5.56、5.45 和 5.8 mm 弹道枪作为发射平台，共射击 6 发，分别选取 SS109 5.56 mm、M74 式 5.45 mm、87 式 5.8 mm步枪弹各 2 发。把明胶作为靶标(尺寸为 300 mm×300 mm×300 mm)。采用 3 台高速摄像机进行拍摄，水平方向放置 2 台(其中 1 台用于拍摄明胶空腔)，竖直方向放置 1 台(与水平方向高速摄像机配合测量攻角)。

实验原理及场景如图 9 所示，天幕靶置于距离靶标 2 m 处测量入靶速度，靶标沿弹道方向置于综合靶架上，光幕和气体灯置于距离明胶侧 1 m 处(气体灯置于光幕后)，高速摄影机置于距离明胶另一侧 1.5 m 处，确保高速摄影机镜头轴线与弹道在同一平面内，且与弹道方向垂直。




1. Gas lamp; 2. Light screen;
3. Gun; 4. Gelatin; 5. Trajectory;
6. 1st velocity measuring screen;
7. 2nd velocity measuring screen;
8. Trigger signal of 1st screen;
9. Trigger signal of 2nd screen;
10. Power;
11. High-speed photography;
12. Data acquisition system.



图 9 实验装置布置图

Fig. 9 Schematic of experimental device

### 2.2 结果与分析

以弹头入靶时刻为计时起点，出靶时刻为计时终点，3 种小口径步枪弹侵彻明胶运动过程如图 10 所示。图 11 为 3 种小口径步枪弹侵彻明胶“颈部”长度对比，由图 11 中可知，相较而言 5.8 mm 普通弹“颈部”长度较小。

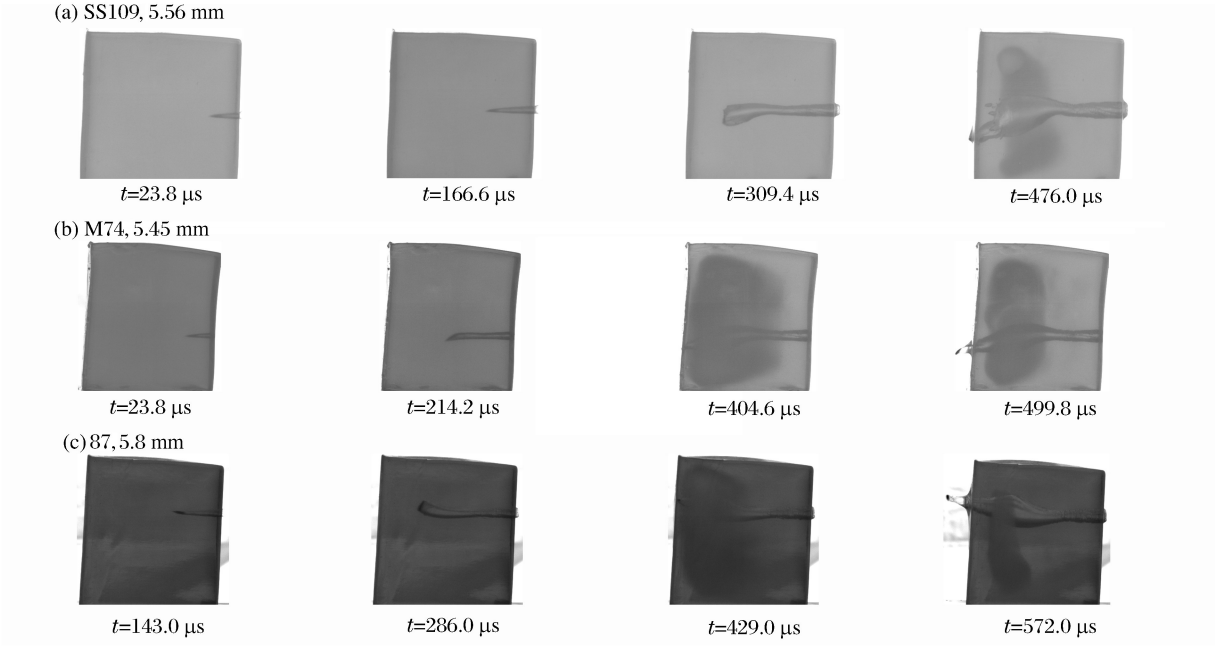



图 10 小口径步枪弹侵彻明胶过程

Fig. 10 Process of small caliber rifle cartridge penetrating into gelatin

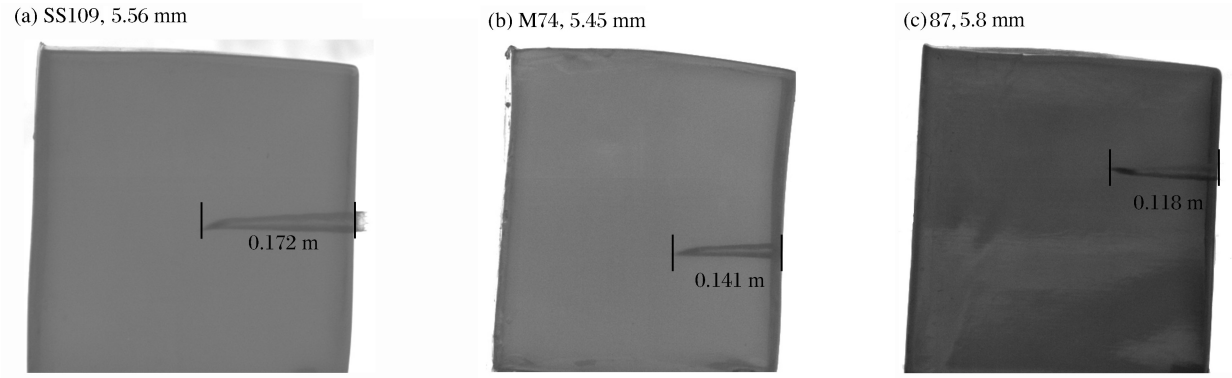



图 11　小口径枪弹“颈部”长度对比

Fig. 11　Comparison of the “narrow channel” length

3 种小口径步枪弹侵彻靶标实测时间分别为 476、486 和 430 μs；5.8 mm 普通弹在攻角较其他 2 种小口径步枪弹略小的情况下，出靶偏角较大，SS109 5.56 mm步枪弹“颈部”阶段长度为 0.172 m，相对误差为 1.7%；出靶速度为 390.2 m/s，相对误差为6.9%；出靶偏角为 101.1°，相对误差为 13%。M74 式 5.45 mm 步枪弹“颈部”阶段结束略早，在侵彻位移为 0.141 m 时进入“翻滚”阶段，相对误差为 5.7%；出靶速度为 368.4 m/s，相对误差为 4.3%；出靶角度为 197.9°，相对误差为 11.6%。87 式 5.8 mm普通弹“颈部”长度较短，为 0.118 m，相对误差为 11%；出靶速度为 350.1 m/s，相对误差为 1.5%；出靶角度高达 235°，相对误差为 5.2%。3 种小口径步枪弹传递给明胶靶标的能量如表 3 所示，$E$ 为弹头总能量，$\Delta E$ 为传递给靶标的能量。可见，87 式 5.8 mm 步枪弹能量传递率比其他 2 种弹高。

3 种枪弹在设计上都具有高速度、小质量、头弧尖长、长径比大、重心后移、易翻滚、能量释放率高等特点，根据创伤弹道学理论可知，肌体致伤决定性因素包括能量释放率及其在肌体中的翻滚能力。实验结果显示：5.8 mm 普通弹相较 SS109 5.56 mm、M74 式 5.45mm 步枪弹，“颈部”长度较短，速度衰减较快，弹头翻滚较快，传递给明胶靶标能量较大，致伤效果较好，较好验证了理论分析结果。

**表 3　弹头在明胶靶中能量的传递**

**Table 3　Transferred energy of cartridge in the process of penetrating in gelatin**

| 弹型 | $E$/kJ | $\Delta E$/kJ | $\eta$/% |
|---|---|---|---|
| SS109 5.56 mm | 1.388 | 1.08 | 78 |
| M74 式 5.45 mm | 1.349 | 1.11 | 82 |
| 87 式 5.8 mm | 1.508 | 1.25 | 83 |

## 3　结　论

基于弹头侵彻明胶平面运动模型，对 SS109 5.56 mm、M74 式 5.45 mm 和 5.8 mm3 种小口径步枪弹致伤效应进行研究。根据龙格-库塔法原理对致伤效应进行数值计算，得出 3 种小口径步枪弹侵彻位移、速度、偏角、$y$ 方向偏移、“颈部”长度、角速度和加速度变化规律，对其致伤效应进行对比分析，并进行各杀伤元侵彻明胶实验，得出各时刻速度 $v$、位移 $x$、偏角 $\psi$ 的实测值，并将理论值与实测值进行对比分析，并得出结论：理论分析结果与实测值一致性较好，我国 87 式 5.8mm 普通弹杀伤性能优于 SS109 5.56 mm、M74 式 5.45 mm 步枪弹，致伤效果较好。3 种小口径步枪弹致伤效应的对比研究可为弹药设计和战伤救治提供依据。

## 参考文献：

[1]　王建中. 自动武器论坛[M]. 北京：国防工业出版社，2007.

[2]　赵智. 面临挑战的小口径枪弹[J]. 轻兵器，2005(23)：30-33.

[3]　袁国柱. 对第二代小口径枪弹的初步分析[J]. 现代兵器，1986(4)：5-8.

[4]　孙俊志，欧日华，李树军. 步枪弹的终点效应与机体的创伤效应研究[J]. 华北工学院学报，1999，20(2)：145-150.

[5]　傅荣向. 小口径枪弹致伤效应的试验与分析[J]. 轻兵器，1983(8)：49-52.

[6] 刘宏勋,马志杰.北约 5.56 mm、俄 5.45 mm、中国 5.8 mm 枪弹评测[J].轻兵器,2003(8):26-27.
[7] 马式曾.北约的 SS109 式枪弹好,还是苏联的 5.45.毫米枪弹好[J].现代兵器,1987(5):24-25.
[8] 刘坤,吴志林,徐万和,等.弹头侵彻明胶的运动模型研究[J].爆炸与冲击,2012,32(6):616-622.
Liu Kun, Wu Zhi-lin, Xu Wan-he, et al. A motion model for bullet penetrating gelatin[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(6):616-622.
[9] 刘坤,吴志林,徐万和,等.弹头侵彻明胶的运动模型参数研究[J].高压物理学报,2013,27(5):677-684.
Liu Kun, Wu Zhi-lin, Xu Wan-he, et al. Research on Model Parameters of Bullet Penetrating Gelatin[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013,27(5):677-684.
[10] 卞荣宣,卞炜.谁是 5.56 毫米的继任者?美国酝酿新口径步兵武器[J].现代军事,1996(3):55-56.
[11] 王坚.小口径和微口径枪弹的发展[J].枪弹评论,1979(5):26-29.
[12] Veth D C. Development of the new second NSTO caliber: The "5.56" with the SS109 projectile[J]. Acta Chirurgica Scandinavica, 1982,508(5):129-134.
[13] 卞荣宣.现代军用枪弹[J].现代军事,1996(7):56-58.
[14] 范伟,王岐鹏.另辟蹊径:DBP87 式 5.8 mm 普通弹独占鳌头[J].轻兵器,2001(9):6-7.
[15] 范伟.小口径枪弹的奇葩:中国 DBP87 式 5.8 毫米普通弹[J].兵器知识,2000(10):30-32.
[16] 郭首伟.87 式 5.8 mm 枪弹侵彻力试验[J].轻兵器,2000(2):27-28.
[17] 郭首伟.更显威力的 87 式 5.8 mm 枪弹[J].轻兵器,1999(8):10-11.

# Wounding effects of three kinds of small caliber rifle cartridges *

Liu Kun[1,2], Wu Zhi-lin[1], Xu Wan-he[1], Mo Gen-lin[1]
(1. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*
2. *Nanjing Mint Co. Ltd, Nanjing* 211100, *Jiangsu, China*)

**Abstract**: To research the wounding effects of small caliber rifle cartridges, the following cartridges were chosen as the investigated objectives: the 5.56×45 mm NATO, 5.45×39 mm and 5.8×42 mm DBP 87 rifle cartridges. A series of theoretical analyses were performed for the above cartridges on their structural characteristics, performance parameters and motion in gelatin. The corresponding experiments were carried out for the cartridges penetrating into gelatin targets and the experimental results were discussed. The wounding effect of the 5.8×42 mm DBP 87 rifle cartridge was the best among the three kinds of small caliber rifle cartridges, which was consistent with the theoretical analyses.

**Key words**: mechanics of explosion; wounding effects; "narrow channel" length; small caliber rifle cartridge; gelatin

* Received 22 January 2013; Revised 1 September 2013
Supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (613104)
Corresponding author: Wu Zhi-lin, wuruinan-1994@mail.njust.edu.cn

(责任编辑 王易难)